

УДК 504.064.45

Белоусова К.О., студент ХНм-251
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
Belousova K.O, student HNm-251
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

ОТХОДЫ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ИСТОЧНИК РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

COAL INDUSTRY WASTE AS A SOURCE OF RARE EARTH ELEMENTS

Редкоземельные элементы (РЗЭ) стали критически важными материалами и движущей силой технологического прогресса в быстро развивающемся современном мире. Благодаря своим уникальным свойствам они незаменимы практически во всех областях деятельности человека – от оборонной, энергетической и электронной промышленности до автомобилестроения и авиастроения.

Растущий спрос на ценные элементы обусловлен двумя ключевыми тенденциями. Во-первых, это стремительное развитие и растущее потребление электротехнического и электронного оборудования (от смартфонов и компьютеров до медицинской техники). Во-вторых, переход от традиционных источников энергии к альтернативной «зеленой» энергетике: солнечные батареи, электромобили, ветряные турбины, где РЗЭ играют ключевую роль [1-3].

С 1990 года Китай закрепил за собой статус ведущего производителя в редкоземельной индустрии, который сохраняется и сегодня. На его долю приходится свыше 85% выпуска РЗЭ, что вынуждает другие страны мира зависеть от китайского импорта. Согласно данным Геологической службы США (USGS) за 2022 год, подтвержденные резервы оксидов РЗЭ в Китае оцениваются в 44 млн т, что более чем в два раза превышает российские запасы (21 млн. т). При этом объем добычи в Китае демонстрирует значительный рост: в 2022 году он достиг 210 тыс. т (в пересчете на Ln_2O_3) – это на 25 % выше показателя 2021 (168 тыс. т). Уровень добычи в России остается существенно более низким и стабильным, составив 2,6 тыс. т как в 2021, так и в 2022 году. Доминирование Китая на рынке критически важных полезных ископаемых подчеркивается в опубликованном отчете USGS за 2023 год. Согласно которому, из 50 элементов, признанных критически важными (включая 14 лантаноидов), 30 добываются на территории Китая [4-6].

Экспортные ограничения, введенные Китаем в 2010-2011 годах, наглядно продемонстрировали уязвимость мировой экономики на редкоземельную продукцию. Это стало мощным стимулом для многих стран мира,

включая Россию, активизировать научные и технологические исследования на разработку эффективных методов получения РЗЭ как из первичных источников, так и из вторичного сырья, таких как отвалы горнорудного производства, отходов углеобогащения, золошлаковых отходов, с целью обеспечения собственной сырьевой безопасности [7-8].

РЗЭ характеризуются сходными химическими свойствами, что обуславливает их классификацию на две основные группы по растворимости в двойных солях: легкие РЗЭ, или цериевая подгруппа (от лантана до европия), и тяжелые РЗЭ, известные как иттриевая подгруппа (от гадолиния до лютения включительно). В природных условиях РЗЭ встречаются преимущественно в форме трёхвалентных катионов в составе карбонатных, оксидных, фосфатных и силикатных минералов. Из приблизительно 200 известных редкоземельных минералов, содержащих свыше 0,01% РЗЭ, промышленное значение имеют лишь немногие [4, 9].

Процесс добычи полезных ископаемых сопровождается извлечением значительного количества пустой породы (балласта), не имеющей промышленной ценности, что приводит к существенному росту энергозатрат и экономических издержек предприятий.

В Российской Федерации экологическая обстановка отличается высоким уровнем антропогенной нагрузки и серьезными негативными последствиями для окружающей среды. Значительная часть извлекаемых природных ресурсов используется нерационально, о чем свидетельствуют сравнительные показатели ресурсоемкости внутреннего валового продукта (ВВП): в России этот показатель вдвое превышает значения США и вчетверо – страны Западной Европы. Аналогичная ситуация наблюдается с энергоемкостью, где российские показатели вдвое выше американских и втрое – показателей Западной Европы и Японии. Таким образом, для производства единицы продукции в России привлекается в 2-4 раза больше природных ресурсов, а их неиспользуемая часть поступает в окружающую среду в виде твердых, жидких и газообразных отходов. Так, например, в угледобывающей отрасли при открытой разработке месторождений на 1 тонну добываемого угля приходится 4-5 тонн отходов, которые складируют в отвалы [10-11].

Кемеровская область, являющаяся ключевым угледобывающим регионом России, сталкивающаяся с серьезными экологическими проблемами, связанными с отходами, образующиеся при добычи полезных ископаемых. Так в 2020 году в регионе было образовано 2,93 млрд тонн отходов, из которых 2,76 млрд тонн (94,2%) пришлось на добычу полезных ископаемых. Анализ структуры отходов показывает абсолютное преобладание отходов V класса опасности (от 99,83 до 99,95%), основным источником которых является угледобыча – вскрышные и вмещающие породы [12].

Одним из направлений в снижении экологического и экономического ущерба от отходов угольной промышленности является разработка технологий извлечения РЗЭ. Утилизация отвалов с попутным получением ценных

компонентов позволяет не только уменьшить объемы накопленных пород, но и создать новые источники стратегически важного сырья.

В настоящее время изучаются возможности переработки отходов обогащения угля, образующиеся на АО ЦОФ «Березовская», в частности породы тяжёлосредней сепарации – БФ-4 (класс +13 мм) и продуктов гидравлической отсадки – БФ-5 (класс 0,5–13 мм) [13].

В публикации [8] представлены условия и результаты кучного выщелачивания отходов углеобогащения сернокислыми растворами. На модельных образцах (гранулы отходов БФ-4 и БФ-5 с содержанием оксида лантана 0,1%) изучено влияние концентрации серной кислоты, скорости ее подачи и соотношения фаз на степень перехода лантана в фильтрат. Экспериментальные данные показали, что эффективность извлечения возрастает с увеличением объема, концентрации кислоты и скорости ее подачи. При этом максимальный выход лантана наблюдается через 6–9 часов после начала процесса.

Параллельно исследуются методы получения редкоземельного концентрата из сернокислых фильтратов. В частности, в исследовании рассматриваются условия применения щавелевой кислоты для селективного осаждения РЗЭ при минимальном соосаждении примесей алюминия и железа.

Таким образом, разработка технологий извлечения РЗЭ из отходов угольной промышленности позволяет одновременно решить две задачи: снизить экологическую нагрузку от накопленных отвалов и создать новый источник ценных элементов, необходимых для высокотехнологичных отраслей и «зеленой» энергетики. Проведенные исследования подтверждают принципиальную возможность и эффективность извлечения РЗЭ из отходов углеобогащения методами выщелачивания с последующим осаждением, что открывает путь к обеспечению сырьевой безопасности и развитию экономики.

Список литературы

1. Tanushree Dutta, Ki-Hyun Kim, Minoru Uchimiya, Eilhann E Kwon. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. Environmental Research. 2016; 150(26):182-190. (In Eng.) doi: 10.1016/j.envres.2016.05.052.
2. Ross K Taggart, James C Hower, Gary S Dwyer, Heileen Hsu-Kim. Trends in the Rare Earth Element Content of U.S.-Based Coal Combustion Fly Ashes. Environmental Science and Technology. 2016; 50(11). (In Eng.) doi: 10.1021/acs.est.6b00085.
3. Ata Akcil, Ceren Erust, Chandra Sekhar Gahan, Mehmet Ozgun. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants – A review. Waste Management. 2015; 45(Urban Mining):258-271. (In Eng.) doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.017.

4. Ariuntuya Battsengel, Altansukh Batnasan, Ariumbolor Narankhuu, Kazutoshi Haga. Recovery of light and heavy rare earth elements from apatite ore using sulphuric acid leaching, solvent extraction and precipitation. *Hydrometallurgy*. 2018; 179. (In Eng.) doi: 10.1016/j.hydromet.2018.05.024.

5. Rare Earths Statistics and Information [Electronic resource] // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey: [Website]. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения: 01.10.2025).

6. U.S. Geological Survey, 2023, Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey, 210 p. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017.

7. Nabeel Mancheri, Benjamin Sprecher, Gwendolyn Bailey, Jianping Ge. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources Conservation and Recycling*. 2018; 142(march 2019):101-112. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017

8. Белоусова, К. О. Подбор оптимальных условий для извлечения лантана из отходов АО ЦОФ «Березовская» / К. О. Белоусова, Н. А. Золотухина, Ю. А. Винидиктова // Сборник материалов I Международной VII Всероссийской конференции «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». Кемерово : КузГТУ, 2024 . С. 1-7.

9. Adam Jordens, Ying Ping Cheng, Kristian Edmund Waters. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*. 2013; 41:97–114. (In Eng.) doi: 10.1016/j.mineng.2012.10.017

10. Белоусова, К.О. Проблемы отходов углепереработки и пути их решения / К.О. Белоусова, А.А. Мальцева // II Всероссийская научно-практическая конференция студентов и школьников «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2024. – С. 1-5.

11. Абдрахимов, В.З. Исследование регрессивным методом анализа влияния шлака от выплавки ферросплавов на физико-механические показатели керамического кирпича / В. З. Абдрахимов, Л. Е. Хабибулина, Д. В. Абдрахимов // Эксперт: теория и практика. — 2020. — № 6. — С. 48-59.

12. Михайлов, В.Г. Совершенствование механизмов обеспечения геоэкологической безопасности в области обращения с отходами / В. Г. Михайлов, А. А. Хорешок // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2022. — № 3. — С. 40-54

13. Черкасова, Т. Г. Перколяционное выщелачивание гранул образцов АО ЦОФ «Березовская» 0,05 М раствором серной кислоты / Т.Г. Черкасова, Н.А. Золотухина, Д.А. Баранцев и др. // Уголь. 2024;(8):71-75. doi: 10.18796/0041-5790-2024-8-71-75.

14. Chi R., Xu Z. A solution chemistry approach to the study of rare earth element precipitation by oxalic acid. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1999; 30:189–195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/S11663-999-0047-0>

References

1. Tanushree Dutta, Ki-Hyun Kim, Minor Uchimiya, Eilhann E Kwon. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. Environmental Research. 2016; 150(26):182-190. (In Eng.) doi: 10.1016/j.envres.2016.05.052.
2. Ross K Taggart, James C Hower, Gary S Dwyer, Heileen Hsu-Kim. Trends in the Rare Earth Element Content of U.S.- Based Coal Combustion Fly Ashes. Environmental science and Technology. 2016; 50(11). (In Eng.) doi: 10.1021/acs.est.6b00085.
3. Ata Akcil, Ceren Erust, Chandra Sekhar Gahan, Mehmet Ozgun. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants – a review. Waste Management. 2015; 45(Urban Mining):258-271. (In Eng.) doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.017.
4. Ariuntuya Battsengel, Altansukh Batnasan, Ariunbolor Narankhuu, Kazutoshi Haga. Recovery of light and heavy rare earth elements from apatite ore using sulphuric acid leaching, solvent extraction and precipitation. Hydrometallurgy. 2018; 179. (In Eng.) doi: 10.1016/j.hydrometer.2018.05.024.
5. Rare Earths Statistics and Information [Electronic resource] // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey: [Website]. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения: 01.10.2025).
6. U.S. Geological Survey, 2023, Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey, 210 p. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017.
7. Nabeel Mancheri, Benjamin Sprecher, Gwendolyn Bailey, Jianping GE. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. Resources Conservation and Recycling. 2018; 142 (march 2019):101-112. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017
8. K. O. Belousova, N. A. Zolotukhina, and Yu. A. Vinidiktova ."Selection of Optimal Conditions for the Extraction of Lanthanum from Waste at the JSC Tsof" Berezovskaya."Collection of Materials from the 1st International conference "Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects", KuzGTU, 2024, pp. 1-7.
9. Adam Jordens, Ying Ping Cheng, Kristian Edmund Waters. A review of the benefit of rare earth element bearing minerals. Minerals Engineering. 2013; 41:97–114. (In Eng.) doi: 10.1016/j.mineng.2012.10.017
10. K.O. Belousova, A.A. Maltseva Problems of Coal Processing Waste and Their Solutions II All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Schoolchildren "Ecology and Life Safety". KuzGTU, 2024, pp. 1-5.
11. Abdrakhimov, V. Z., et al. Research by the regression method of the analysis of the influence of slag from smelting ferroalloys on the physical and mechanical indicators of ceramic bricks. Expert: Theoriya i Praktika, no. 6, 2020, pp. 48-59.

12. Mikhailov, V. G., and A. A. Khoreshok. "Improving the Mechanisms of Ensuring Geoecological Safety in the Field of Waste Management." Izvestiya Tulgu. Earth Sciences, no. 3, 2022, pp. 40-54.

13. T.G. Cherkasova, N.A. Zolotukhina, D.A. Barantsev, et al. Percolation leaching of granules of Berezovskaya JSC Central Mining and Processing Plant with 0.05 M sulfuric acid solution. Coal. 2024;(8):71-75. doi: 10.18796 / 0041-5790-2024-8-71-75.

14. Chi R., Xu Z. A solution chemistry approach to the study of rare earth element precipitation by oxalic acid. Metallurgical and materials Transactions B. 1999; 30:189–195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/S11663-999-0047-0>